

地上における紫外線量の変動

宮内 正厚

(平成 16 年 9 月 30 日受理)

Variations of Ultraviolet Radiation on the Ground Surface

MIYAUCHI, Masaatsu

(Received on September 30, 2004)

キーワード：有害紫外線，紅斑紫外線，紫外線トレンド，分光光度計

Key words：UV-B, Erithemal UV, UV trend, Spectro-photometer

はじめに

「紫外線を浴びて風邪をひかない，健康な小麦色の肌をつくる」，過去においては，紫外線は人体に対して有益なものと考えられていた．特にアメリカの白人社会の富裕層では紫外線を浴びて肌を小麦色に焼くことが一つのステータスになった時代もあった．私たちの若い頃も夏には思いきり肌を焼き，それが推奨された部分もあった．最近まで母子手帳には「新生児には日光浴が必要である」という厚生労働省の指導があった．しかし 1984 年のオゾンホールが発見に伴って，一連のオゾン層破壊に関する多くの研究がなされ (WMO, 1999)，その結果，オゾン層破壊に伴う地上での有害紫外線の増加が地上の生態系，人体等に与える影響についての多くの知見が得られた (ICNIRP, 1995)．その成果の一つとして，かつて肯定的だった紫外線の人体に対する影響についての知識が大幅に拡大し，人体に対して紫外線は何の利益をもたらさなばかりでなく過度の照射は非常に有害であるという一般的な認識が得られた．今回はオゾン層破壊に伴って生じる地上における紫外線の変化と実際に観測される地上における紫外線状況について述べる．

1. 紫外線について

紫外線とは一般的に太陽放射に含まれる 400 nm 以下の波長域を呼ぶが，文献によっては多少異なる場合がある．気象庁では紫外域日射と呼んでいるがここでは単に紫外線と呼ぶ．大気外における太陽放射の紫外線量は 109.8 W/m^2 で全放射量の約 8.0% (< 400 nm)，B 領域

紫外線は 29.1 W/m^2 で 2.1% ほど (< 320 nm) である (WRC spectrum; after Iqbal, 1983)．地上での UV-B は，例えば 2000 年のつくばでは夏至付近の晴天日 6 月 18 日 12 時 (太陽天頂角 13.3°) で 2.96 W/m^2 ，冬至付近の晴天日 12 月 24 日の 12 時 (太陽天頂角 59.6°) で 0.86 W/m^2 と激減する (気象庁, 2002)．このように同じ晴天日でも地上での値は，太陽天頂角に大きく依存し，さらに雲による減衰，空気，エアロゾルによる散乱・吸収，大気中のオゾン等の吸収ガスによる吸収等，様々な要因で減衰し，地上に到達する．オゾン層破壊はオゾンの Hartley bands による吸収が緩和され，地上に届く B 領域紫外線を増加させることにある (Liou, 1980)．地上での紫外線が増加することによる地球環境への影響は様々であるが，特に生物に与える影響を考慮した場合に，紫外線をその程度に応じて領域を A, B, C 領域紫外線と区別されている (必要に応じて UV-A, UV-B, UV-C という)．

人体の特に皮膚に与える影響としては，皮膚癌が最も懸念されている．皮膚細胞の DNA を損傷し皮膚癌を発症させる度合いは波長によって異なり，国際照明学会によるその程度を示す曲線を紅斑作用曲線 (Erythemal Action Spectrum) と呼ばれている．皮膚に対する有害紫外線量を定義する時に使用され (CIE, Technical Report, 1997)，それを紅斑紫外線量 (Erythemal Dose) と呼んでいる．

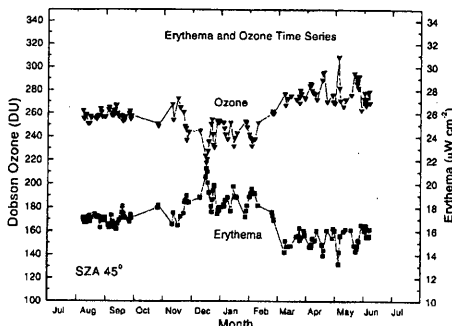
日本ではオゾン層破壊に伴って増加しているであろう有害な紫外線を把握，監視するために Brewer 分光光度計 (Brewer Spectrophotometer: MK II) をつくばで 1990 年，札幌，鹿児島，那覇で 1991 年に整備し，

290 - 325 nmの全天紫外線スペクトルの観測を開始した。国際的にはWMOが紫外線監視網を構築、観測結果は世界気象機関(WMO)の全球大気監視計画(GAW Programme)の一環として組織された、カナダ環境省のカナダ気象局内に設置されている世界オゾン紫外線センター(WOUDC)へ送ることが推奨されている。送られるデータは広帯域紫外線(Broad-band UV)、多波長帯紫外線(Multi-band UV)および紫外線波長分布(Spectral UV)がある。これらのデータは研究・教育を目的として一般に開放されている。

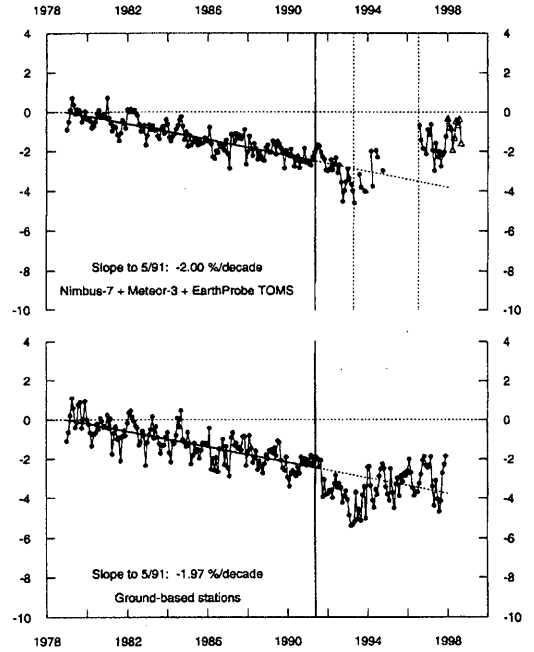
2. オゾン層破壊の状況

UV-Bは大気中で大幅に減衰し、地上に到達するが、大気等の状態が一定だとすると地上のUV-Bはオゾン全量に大きく依存し、オゾンが1%減少すると有害紫外線は1.5%程度増加する(第1図)。そのことによって皮膚癌の発症率が3%増加するといわれている。第2図は著しいオゾン層破壊が始まったとされる1970年代後半から1998年頃にかけての全球平均オゾン全量の変化を示す。図から1990年までのトレンド(年々の長期変化傾向を意味する)はおよそ10年あたり2%である(WMO, 1999)。しかし、季節、地域によって大きく異なり特に北半球の高緯度の春先に大きく10年で5%以上減少した地域もあった(WMO, 1998)。

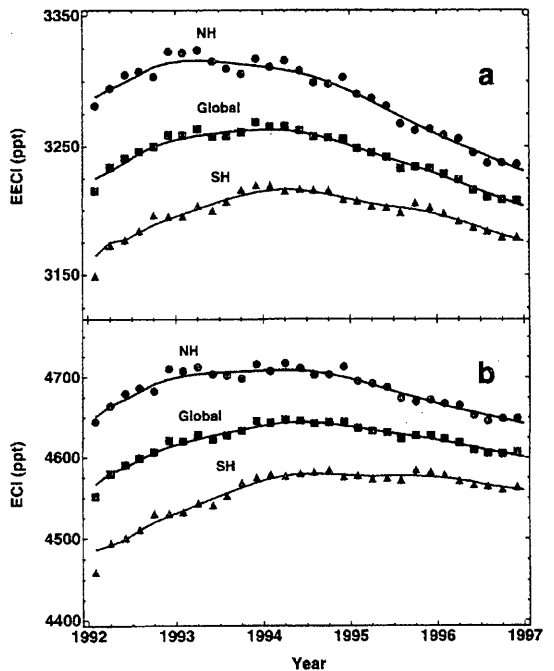
一方、いわゆる「ウィーン条約」、「モントリオールの議定書」などの国際協調によって大気中のオゾン層破壊物質が減少し始め、2050年頃にはオゾン層破壊物質はオゾン層が破壊される前の状態に戻るであろうという見解が示された(第3図)(WMO, 1999)。したがって、オゾン層破壊に伴う有害紫外線の脅威は一応回避される見通しとなっている。



第1図 Mauna Loaにおける1995年7月から1996年7月までの晴天日のオゾン全量と紅斑紫外線量の推移。SZAは45°(WMO, 1999)



第2図 60°Sから60°Nの全球平均のオゾン全量トレンド。図中のトレンド直線は1979/1月から1991/5月の期間を示す。上段はTOMS、下段は地上における測定による(WMO, 1999)



第3図 対流圏におけるオゾン層破壊等価塩素量でaは下部成層圏、bは南極オゾンホールに対応している。(WMO, 1999)

3. オゾン層破壊に伴う地上紫外線の増加の検知

オゾン層が破壊されると有害紫外線が増加することは明らかであるが、実際にどのように増加しているか、実測によってそれを検知する試みが行われた。しかしそれは簡単なことではない。

3-1 Robertson-Berger 紫外線計による紫外線のトレンドの間違い

Scotto et al. (1988) は、アメリカでの癌の発症と紫外線の関連を調査する目的で構築されたアメリカの Robertson-Berger 紫外線計 (以後RBメーターという) 観測網のデータ (8箇所) を使って有害紫外線のトレンドを解析した。結果は1974~1985年で $-7\%/10$ 年であった。この期間はオゾン層破壊がすでに始まっていて増加していると考えられていた有害紫外線が、減少しているという結果になった。Scotto et al. はその理由としてオゾン層破壊の効果よりも対流圏の物理的、気象学的要素が予想以上に大きいと暗示した。

Weaterhead et al. (1997) は改めてデータを見なおし、1774~1991年のトレンドを解析した。その結果、有害紫外線のトレンドを解析するにあたっては測定器の観測精度が長期間良好に、安定して紫外線を測定する事が必要であるということ、しかしそれは容易ではないことを示した。その概要を示す。

- 1960年の後半にアメリカ大気海洋局 (NOAA) によって整備されたRBメーター観測網のうち14の観測地点を選択し、1974-1991年のCalibrated Dataを解析した。ここでいうCalibrationは測定値をメモリ付けする一連の作業を言う。
- Photo-reluminescence (Photo-sensitive) 法による測

定器は短波長側で敏感、生物に対する作用波長分布 (Action Spectrum) 特性に近い。

- このセンサーの感度は経年に対して非常に安定しているが、Calibration方法等に問題があり、Absolute Scaleを維持しにくい。また温度依存性が高く $0.8\%/^{\circ}\text{C}$ と高い。Cosine Responseがかなり悪い。
- 長期 (20年間) にわたるネットワークの管理と長期にわたるCalibrationの継続、および設置場所の変更を余儀なくされ、管理者が変わる時にCalibrationなどに関するの多くのDocumentが失われた。
- 最初の15年間は1年ごとにTraveling Secondary StandardをSide by sideでCalibrationをした。Secondary StandardはNIST Standard Lampで較正。1980年頃一部をQuart Halogen LampからXenon Ark Lampに変えたことによる変化を正しくfollowしていなかった。
- Networkによる観測期間 (1774-1991) の終了時にはCalibration記録によると30%の感度変化があったものもあった。中にはそれほど頻繁には起こったわけではないが1年で10%変化したのものもあった。原因ははっきりしていない。感度は+に変化する場合と-に変化する場合とは同様な頻度であった。測器そのものの変化なのか、Calibrationが適切でなかったのか明らかではない。
- 数地点のデータは晴天のばあい衛星に搭載されたオゾン全量マッピング分光計 (TOMS: Total Ozone Mapping Spectro-photometer) から推定した地上での計算値と比較して、季節変化と日々の変化は良く一致した。また、晴天のデータはTOMSによるオゾン量と相関があるようにみえた。

第1表 Weatherhead et al. (1997) で解析された有害紫外線のトレンド Shift Intervention をしない場合、した場合、Shift後のデータを使用した場合

Calibrated Data Trend for 14 stations

(1) (without Shift Intervention 1978-1980)	Annual Trend: -6% Winter: -8% Spring: -6% Summer: -5% Winter: -9%
(2) (with Shift Intervention 1978-1980)	Annual Trend: $+2\%$ Winter: $+0.5\%$ Spring: $+2\%$ Summer: $+3\%$ Winter: -0.5%
(3) (After the Shift 1978-1980)	Annual Trend: $+0.5\%$ Winter: $+1\%$ Spring: $+1\%$ Summer: $+0.5\%$ Winter: 0%

・データに不自然な段差 (Level Shift) があり、トレンドはそれによって大きく左右されている。Shiftの原因は測定システム, Calibration, 測定場所の環境変化 (気象を含む) によって生じる。第1表は Shift Intervention (介入) を考慮した時の有害紫外線のトレンドを示したものである。

Weatherhead 等はこの論文の結論として、有害紫外線測定について留意しなければならない点を挙げている。(1) オゾン層破壊に伴って UV-B が増加していることは明らかであるにも拘わらずその期間において減少した。測定に関連した Level Shift に大きく影響を受けている。結果からわかるようにこの Shift を認めることによってより正しい結果が得られ、その結果として Negative Trend から Positive Trend に改善された。

(2) データの解析を精査した結果、トレンドに関係するオゾン以外の物理量について以下のことが判明した。

- ・SO₂, NO₂ 対流圏オゾンはトレンドに与える影響は少ない (数値計算による)。
- ・雲の変化によるトレンドへの影響は日射量のデータを勘案してみると結果として影響はなかったと考えられる。
- ・気温変化は概ね一定で、温度によるトレンドへの効果はない。
- ・測定システムに関連した原因で生じた Level Shift は明らかであるがその原因は特定できなかった。しかしそれを補正することによってトレンドの説明がしやすくなった。

(3) この研究によって、信頼できる長期間にわたる地上での紫外線測定の困難性が示された。回避する手立てとして日射量の測定と衛星データを補助的に利用する必要がある。また検定などの Document の管理が重要であ

る。

3-2 日本 (気象庁) による有害紫外線測定

気象庁はオゾン層破壊に伴って増加するであろう有害紫外線を監視する目的で紫外線の観測の測定を始めた (気象庁, 2002, オゾン層観測年報)。観測データは世界オゾン・紫外線データセンタ (WOUDC) に送られ、一般の利用に供されている。正確な測定を目的として気象庁は次のような一連の検定を行っている (WOUDC, Metadata http://www.msc-smc.ec.gc.ca/woudc/index_e.html)。このことについて述べる。

「検定」はいろいろな意味で使用されているがここでは

(1) 各分光光度計は測定を開始する前に一定電流 (7.9 or 8.0 amp) を流した Traceable NIST ランプで値付けする。気象庁はこれを検定 (Calibration) と定義している。

(2) その他に2種のランプを使用し、そのうちの一つは内部に搭載し分光光度計の安定度をチェックする。一日3回 (日の出, 正午, 日の入り) 感度変化を監視するために使用される。

(3) もう1種は外部に装着し、内部光源と比較することで分光光度計の感度変化をチェックする。外部光源は各分光光度計に5個用意し、一週間ごとに2個について一か月毎に3個、半年毎に5個のランプでチェックされる。

(4) #113 の Brewer 分光光度計について国際比較検定を実施し、日本の国内準器とした。数年に一度国内の測器と比較検定 (Intercomparison) をして感度を決定する。晴天時に Side by side で行う。以上をまとめて第2表に示す。

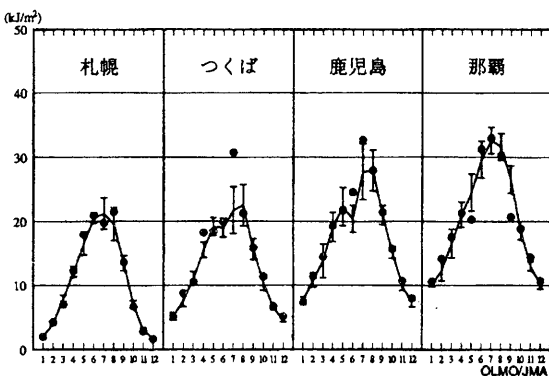
Calibration (検定) は1000W lamp による (traceable to NIST)。Stability check (機器の安定性) のための

第2表 気象庁が行っているUV観測網のCaribration操作手順

Intercomparison	every 3 years
Calibration	every 3 years
Stability checks:	
External 50W lamp	2 lamps : every week
	3 lamps : every month
	5 lamps : every half year
Internal 20W lamp	3 times a day

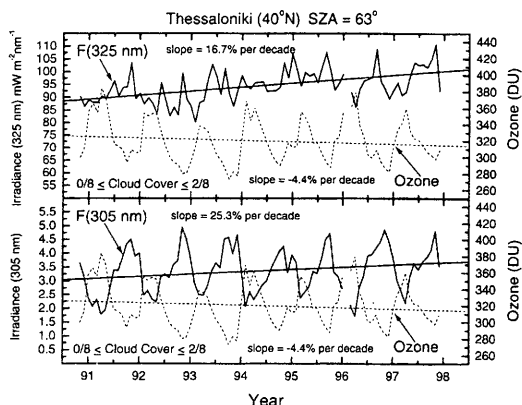
外部光源は一定の出力を持つランプ (untraceable to NIST) によって機器の感度変化を監視する (ランプハウス使用)。このようにエネルギーとしては微弱な紫外線を精度良く測定することは容易ではない。WMOは紫外線測定に際しての精度を高めることを目的として一定のガイドラインを示している (WMO, 1998) ので参照されたい。

気象庁の観測データから札幌、つくば、鹿児島、那覇のUV-B (290 - 325 nm) の季節変化を第4図に示す (気象庁, 2002)。実線は月平均日積算値の1990 - 2000年の平均値を示す。黒丸は2001年の値である。図から①各地において季節変化が大きい ②観測地点で大きな差がある ③つくばの7月は突出しているが晴天の日が多かったことによる。これらの主な原因は観測地点の緯度 (太陽天頂角) と雲による。雲の影響がなければ一義的には太陽の位置による。



第4図 UV-Bの日積算値、実線は過去データの平均値で黒丸は2001年の値 (気象庁, 2002)

一方、オゾンのハートレー吸収帯 (Hartley Bands) によって、特に短波長側で強い吸収を受け、オゾン全量と地上のUV-B量は強い逆相関を持つ (前述)。しかし図に見られるように季節変動の中にはオゾンの変化は直接的には見られないばかりでなく、オゾン層破壊に伴って地上での有害紫外線の増加を検知することは前に述べたように非常に困難である。Zerefos他 (1997) はギリシャのThessalonikiでの1991年から1998年までのオゾン全量と305及び325nmの月平均値の変化を示した。第5図はZerefos他をもとにScientific Assessment of Ozone Depletion: 1998 (WMO, 1999) に転載されたものである。それぞれの波長で10年あたり25.3%、16.7%と猛烈な勢いで増加している。オゾン全量は10年あた



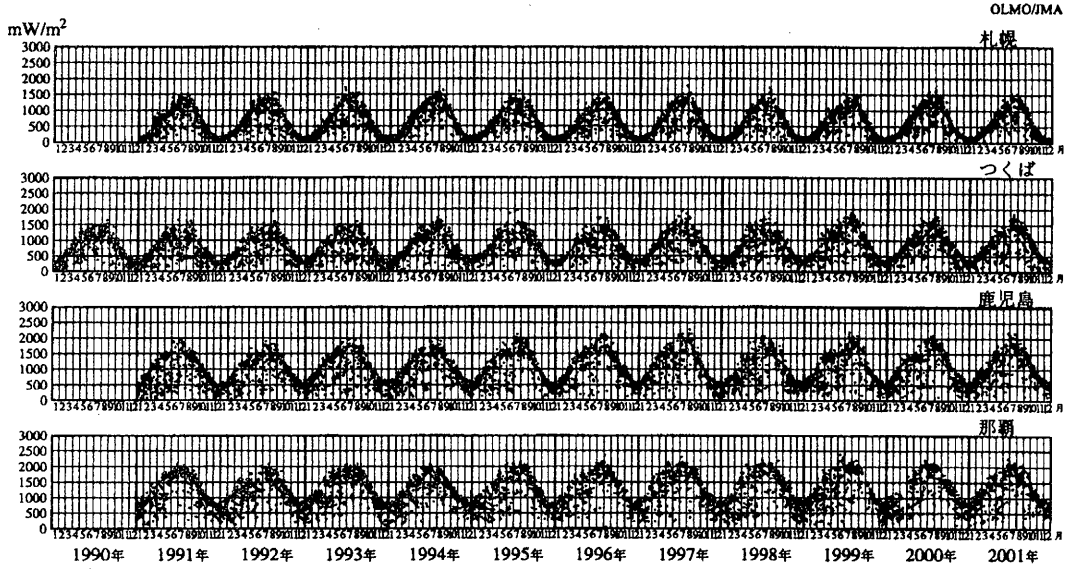
第5図 ギリシャのテサロニキにおける晴天時のオゾン全量と紫外線の推移 (太陽天頂角が63度の時) (Zerefos et al., 1997)

り-4.4%の変化であることを考慮すると、オゾンの変動による影響の少ない325nmの振る舞いなどから主な原因はAerosolの減少であるとしている。

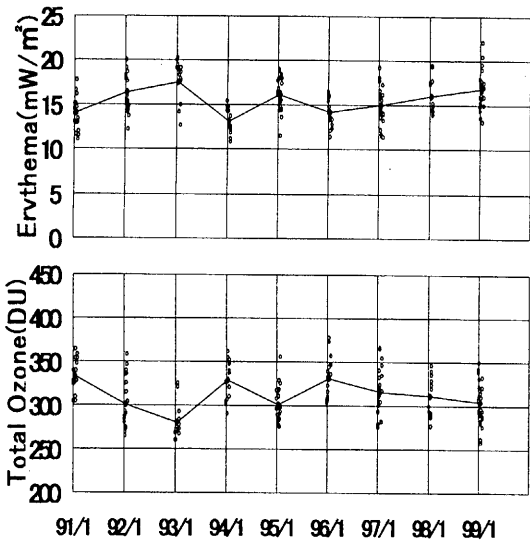
気象庁が観測したUV-B (290 - 325 nm) の年々変動を第6図に示す。図中の点は日々の最大値を示している。従って包絡線は晴天日の南中時付近の値を示す。季節変化が大きく、この図からではUV-Bの年々変動は読み取れない。さらに測定場所により、特に冬季の値に大きな差がある。

Miyauchi et al. (2000) は気象庁の観測データをもとに、札幌、つくば、鹿児島、那覇における晴天日の $\mu 1.5$ 、 $\mu 2.5$ の時の305、324nmおよび紅斑紫外線量の9年間の変化を解析した ($\mu = \sec \theta$; θ は太陽天頂角)。第7図には晴天の日が多かったつくばの1月のオゾン量の平均とそれに対応する紅斑紫外線量の9年間の関係を示したものである。晴天時のオゾン変動に対応して紅斑紫外線が明らかに逆相関している事がわかる。第8図にオゾン変動が最も大きい札幌における9年間の晴天日のオゾン、305、324nm及び紅斑紫外線量の月平均偏差の年々変化を示す。目で見える限りでは大きなトレンドは確認できない。そのうち324nmについてはオゾン全量との関連は見られず、この変動はオゾン以外の大気要素に依存する。

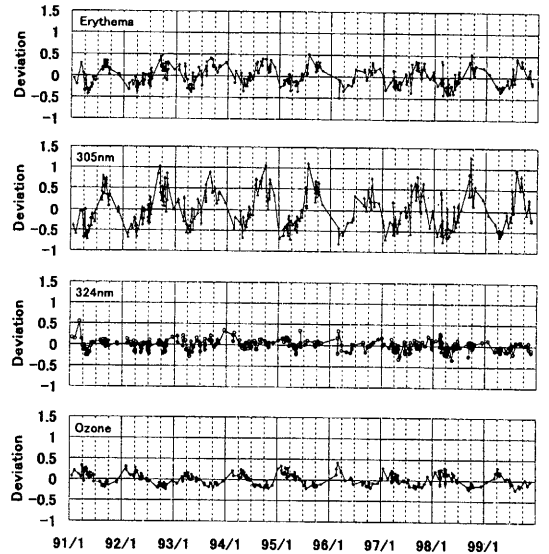
第9図にオゾンによる減衰効果のほとんどない324nmで規格化した305nm、紅斑紫外線量とオゾンの札幌の月平均偏差の年々変化を示す。このことによって大気の状態、エアロゾル、雲の影響などかなり相殺し、この変化はオゾンの変化に大きく依存することになる。



第 6 図 国内 4 地点の観測開始から 2001 年までの UV-B の日最大値 (気象庁, 2002)



第 7 図 つくばにおける 1 月の紅斑紫外線量とオゾン全量の関係 ($\mu 2.5$) (Miyuchi et al., 2000)



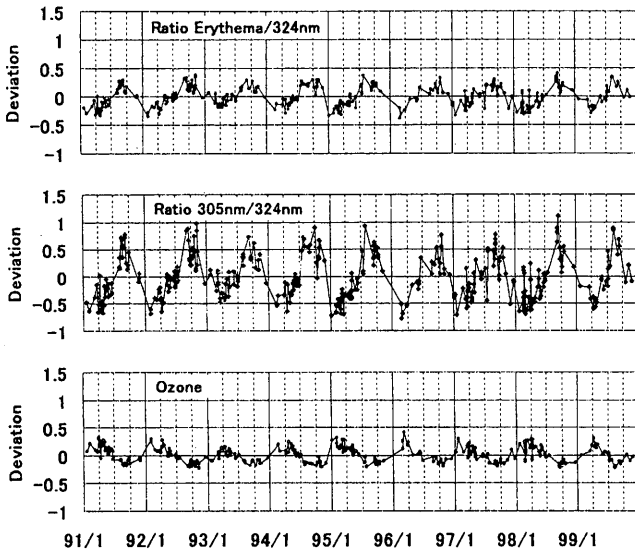
第 8 図 札幌のオゾン全量と紫外線の推移 (Miyuchi et al., 2000)

オゾン変化は季節変動が大きく、結果としてそれら紫外線もはっきりと季節変化を示している。しかし紫外線の季節変動が大きいこともあって、オゾン全量の年々変化に伴う紫外線の変化は読み取ることが難しい。

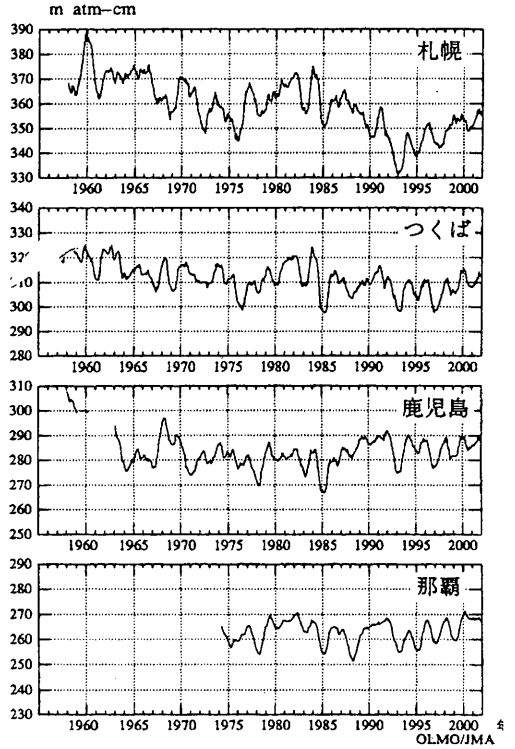
第 10 図は国内 4 箇所観測されたオゾン全量の経年変化を示す (オゾン層観測報告: 2002)。1991 年の Pinatubo 火山噴火の影響で 1993 年は全球的にオゾンが

減少しているが、それ以降は噴火による成層圏エアロゾルが減少することによってオゾン層の回復基調を示している。

オゾン変動に対する紅斑紫外線量の変化を示す RAF (Mckenjie et al., Miyuchi et al.) によりこのオゾン変動による紫外線の変化を除去する。第 3 表は $\mu 1.5$, $\mu 2.5$ の時の国内 4 地点での紅斑紫外線量のトレンドを示



第9図 札幌のオゾン全量と324nmで規格化された紫外線量の推移，オゾン全量の変化に追隨する (Miyauchi et al., 2000)



第10図 季節変動を除去したオゾン全量を13ヶ月移動平均したもの(気象庁, 2002)

第3表 $\mu 1.5$ $\mu 2.5$ の国内4地点における紅斑紫外線量のトレンド
それぞれオゾンによるもの，それ以外によるもの，全体のトレンドを示す

	Ozone trend	by ozone	Other factors	Total	
Sapporo	3.5%	-5.2%	-0.8%	-6.0%	($\mu 2.5$)
		-5.3	-7.0	-12.3	($\mu 1.5$)
Tsukuba	0.6	-0.9	4.4	3.5	($\mu 2.5$)
		-0.9	6.0	5.1	($\mu 1.5$)
Kagoshima	-0.6	0.9	6.4	6.7	($\mu 2.5$)
		0.9	0.1	1.0	($\mu 1.5$)
Naha	1.7	-2.5	11.0	8.5	($\mu 2.5$)
		-2.6	11.0	8.4	($\mu 1.5$)

したものである。オゾン以外の要素によるUV-Bの変化は、札幌では減少傾向で、つくば、鹿児島、那覇では増加傾向を示し、特に那覇では10年あたり10%を超えている。南に向かって増加傾向がある。オゾンによる変化も含めると札幌で大きく減少し、南で高い増加を示す。特に那覇は8%を超える増加を示した。

しかしこの変化の原因については特定していない。こ

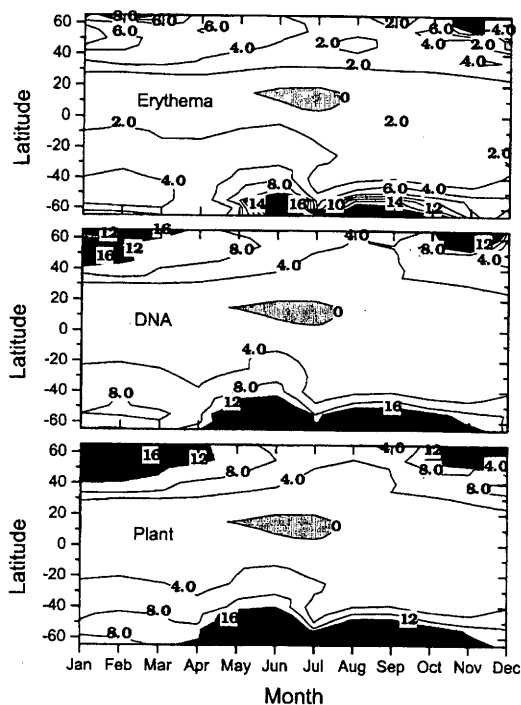
の原因がエアロゾルであるとしても少なくとも国内においてはZerefos等が示したエアロゾルによる大幅な変動は見られない。

4. まとめ

晴天の日を選んだ結果、データが季節的に偏りがある。したがって僅かな紫外線の変動のトレンドを求める際に

解析上の問題点が残る。このようにデータの偏在，周期的な変動をしている場合，統計期間の取り方によってトレンドが異なってしまう。Weatherhead et al. (2000) はこのような変動についてそのトレンドを解析するにはかなり長期間に亘って精度の良い観測を継続する（少なくとも20年）ことが必要であるとしている。

第11図はNASAのNimbus-7の衛星に搭載されたTOMSから推算された有害紫外線の変動の緯度平均季節変化を示す(Herman, 1996)。この増加はほぼオゾン層の破壊のトレンドと対応している。オゾン層破壊による有害紫外線の増加が進めば人体に大きな影響を与えるばかりでなく，地球の生態系に大きなダメージを与える。しかし現在では私達個人個人が受ける有害紫外線の変動は今まで経験したオゾン層破壊によるそれよりもはるかに大きい。前述したように国際協調によってオゾン層破壊は回避される見とおしとなった今，日常生活習慣による有害紫外線の被曝について関心を深める必要がある。



第11図 1979～1992年の紅斑紫外線量の緯度平均季節変化の分布図(%)，南極域と冬の北半球高緯度で高い値を示す。

Reference

- 1) CIE, 1997: Standard erythema dose, a review, Technical Report-125.
- 2) Herman J.R., P.K.Bhartia, J.Ziemke, Z.Ahmad and D.Larko, 1996: UV-B increases (1979-1992) from decreases in total ozone, Geophys. Res. Lett., 23, 2117-2120.
- 3) ICNIRP, 1995: Global solar UV index, ICNIRP cataloguing in publication data, printed in Germany.
- 4) Iqbal M., 1983: An introduction to solar radiation, Academic Press, pp390.
- 5) Liou K.N., 1980: An Introduction to atmospheric radiation, Academic Press, pp.392.
- 6) Mckenzie R.L., W.A.Mathews and P.V.Johnston, 1991: The relationship between erythmal UV and ozone, derived from spectral irradiance measurements, Geophys. Res. Lett., 18, 2269-2272.
- 7) Miyauchi M. T.Kishi K.Ueno K.Akagi and A.Saito, 2000: Variations of UV-B by long term (a decade) observation at four stations in Japan, Proceedings of the QUARDRENNIAL OZONE SYMPOSIUM-Sapporo 2000-, p.243-244.
- 8) Scotto J., G.Cotton, F.Urbach, D.Berger, and T. Fears, 1988: Biologically effective ultraviolet radiation: Surface measurements in the United States, 1974 to 1985, Science, 239, 762-764.
- 9) Weatherhead E.C., G.C.Tiao, G.C.Reinsel, J.E.Frederick, J.J.DeLuisi, D.Choi, and W.Tam, 1997: Analysis of long-term behavior of ultraviolet radiation measured by Robertson-Berger meters at 14 sites in the United States, J. Geophys. Res., 102, 8783-8754.
- 10) Weatherhead E.C., P. Disterhoft and K.O.Lantz, 2000: Past and Expected future trends in UV radiation, , Proceedings of the QUARDRENNIAL OZONE SYMPOSIUM-Sapporo 2000- , p.239-240.

- 11) WMO, 1999: Scientific Assessment of Ozone Depletion:1998, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No.44. P.C.Simon B.Mayer and G.Seckmeyer, 1997: Variability of UV-B at four stations in Europe, Geophys. Res. Lett., 24, 1363-1366.
- 12) WMO/GAW, Guidelines for site quality control of UV monitoring, No. 126, 1998
- 13) Zerefos C.S. D.S.Balis A.F.Bais D.Gillotay
- 14) 気象庁, 2002, オゾン層観測報告:2001.
- 15) 気象庁, 2002, 大気・海洋環境観測報告第2号平成12年度観測成果

Abstract

Variation of ultraviolet radiation (UV) measured by Ground based UV meters are discussed. Generally UV on the ground surface has been considered to increase with ozone depletion. It is fact that UV increase is caused by total ozone decrease, however, it is also affected by the other atmospheric conditions such as cloud and aerosols. So it is necessary to detect the actual UV trend on the ground surface by measurements. Some trials to detect the trend are introduced, as well as quality control of UV monitoring. It is also shown that the UV variations by location and season are much larger than ozone layer depletion in a few decade.